DOI:10.12441/spyswjs.20220914002 [文章编号] 1673-1689(2024)08-0128-12

电子束辐照结合食品添加剂对牛肉饼微生物及感官品质的影响

孔秋莲[1,2] 郑 琦[1,2] 颜伟强[1,2*] 田文慧[1,2] 岳 玲[1,2] 陈志军[1,2] 张艳艳[3] 戚文元[1,2]

(1. 上海市农业科学院作物所,上海 201401; 2. 上海束能辐照技术有限公司,上海 201401; 3. 上海商学院食品系,上海 201400)

摘要:电子束辐照作为一种物理冷杀菌技术,在牛肉饼等预制食品的微生物控制中具有不可替代的优势,但高剂量辐照容易导致含脂食品的风味、色泽等感官品质发生劣变。为了降低电子束辐照对牛肉饼感官品质的不良影响,作者研究了电子束辐照结合食品添加剂对牛肉饼微生物及色泽、风味、滋味等感官品质的影响,并建立了低剂量电子束辐照结合食品添加剂的杀菌保鲜方法。结果表明,1.6 kGy电子束辐照结合丁香油可进一步降低辐照牛肉饼中的微生物水平;同时,1.6 kGy电子束辐照结合护色剂可显著抑制辐照导致的色泽劣变;此外,1.6 kGy电子束辐照对牛肉饼风味评分无显著影响,但不同处理组在电子鼻传感器W1W上表现的响应值差异较大,并发现硫化物是造成风味差异的主要物质。牛肉饼电子舌响应值最高的传感器是鲜味,1.6 kGy电子束辐照后鲜味响应值降低。电子束辐照结合丁香油及护色剂处理的牛肉饼于4 ℃冷藏7 d后,其菌落总数与单一电子束辐照0 d的样品无显著差异,风味评分无显著变化,色泽评分显著高于单一电子束辐照处理,且熟制后仍保持较好的红色色泽,鲜味响应值高于单一电子束辐照处理的样品。该研究为牛肉饼辐照质量控制提供了参考。

关键词:电子束辐照;食品添加剂;牛肉饼;杀菌;感官品质

Effect of Electron Beam Irradiation Combined with Food Additives on the Microbial and Sensory Qualities of Beef Patties

KONG Qiulian[1,2] *ZHENG Qi*[1,2] *YAN Weiqiang*[1,2*] *TIAN Wenhui*[1,2] *YUE Ling*[1,2]
CHEN Zhijun[1,2] *ZHANG Yanyan*[3] *QI Wenyuan*[1,2]

(1. Crop Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201401, China; 2. Shanghai Shuneng Irradiation Technology Co., Ltd., Shanghai 201401, China; 3. Department of Food Science, Shanghai Business School, Shanghai 201400, China)

Abstract: As a physical cold sterilization technology, electron beam (E-beam) irradiation offers unsubstitutable advantages in microbial control for prepared foods such as beef patties. However, high dose irradiation can easily lead to the deterioration in the sensory quality such as flavor and color of fat-containing foods. In order to reduce the undesirable effect of E-beam irradiation on the sensory quality of beef patties, the author investigated the combined effects of E-beam irradiation and food additives on the microbial level and sensory qualities such as color, flavor, and taste of beef patties. A method for low dose E-beam irradiation combined with food additives for preservation and sterilization was established. The results showed that the treatment with 1.6 kGy of E-beam irradiation combined with clove oil effectively reduce the microbial levels in irradiated beef patties. Furthermore, the treatment

基金项目:上海市科技兴农项目(2022-02-08-00-12-F01093);上海市农产品保鲜加工专业技术服务平台项目(21DZ2292200)。
通信作者:颜伟强(1974—),男,博士,助理研究员,主要从事农产品辐照加工研究。E-mail:webweifree@163.com
收稿日期:2022-09-14 **修回日期:**2022-09-30

of 1.6 kGy irradiation combined with a color fixative significantly inhibited the color deterioration caused by irradiation. Notably, E-beam irradiation at dose of 1.6 kGy had no significant effect on the flavor sensory score of beef patties. However, the W1W sensor of the electronic nose exhibited substantial difference in response values among different treatment groups, indicating that sulfides are the main components responsible for flavor differences. The sensor with the highest response value on the electronic tongue for beef patties was umami, which decreased after 1.6 kGy E-beam irradiation. Beef patties treated with E-beam irradiation combined with clove oil and color fixatives exhibited no significant differences in total microbial counts after 7 days of refrigeration at 4 ℃ compared to the samples subjected to E-beam irradiation at day 0. Sensory evaluations revealed no significant changes in flavor scores, while color ratings were significantly higher than those from single E-beam treatments. Additionally, the patties retained a desirable red hue and exhibited higher umami response values after cooking. This study provide a reference for quality control in irradiated beef patties.

Key words: electron beam irradiation; food additive; beef patties; sterilization; sensory quality

随着人们饮食消费方式的多样化和便利化，切割果蔬、调理食品等预制食品加工已成为一个快速发展的新型食品加工产业[1]。预制食品指的是在消费者购买前经过充分预处理，消费者可直接食用或经过简单热处理即可食用的食品[2]。这些食品以农、畜、禽、水产品为原料，经过加工处理后，可在低温（冷冻、冷藏）或常温条件下贮藏、流通和销售。然而，卫生安全隐患是预制食品生产中的一个关键问题，其中微生物超标是导致预制食品监督抽查不合格的主要原因之一[3-4]。牛肉预制食品以营养价值和方便快捷的食用特点深受消费者喜爱[5]，但牛肉中的高蛋白质也为微生物生长提供了良好的环境，即使在屠宰条件得到严格控制的情况下，加工过程中仍可能受到微生物污染[6-7]。因此，牛肉预制食品极易腐败变质，其在4 ℃冷藏条件下的货架期只有3~5 d，而且病原微生物还可能影响牛肉预制食品的食用安全[8]。

辐照是一种安全、高效、环保且节能的非热杀菌技术，它通过杀灭微生物提高食品的食用安全性，已在食品工业中得到了广泛应用[9]。在中国，将辐照用于香辛料、冷冻虾和肉制品等食品杀菌保鲜的历史已有40余年[10]。食品辐照是利用电子加速器产生的高能电子束流，或转靶X射线、放射性核素^{60}Co或^{137}Cs产生的γ射线加工食品的方法。这些方法主要是通过能量传递引发一系列理化反应，从而达到杀菌保鲜的目的[11-12]。目前生产中普遍应用的辐照装置包括电子加速器和钴源，与钴源装置相比，电子加速器能源利用更充分、处理效率也更高。商业化加工的10 MeV电子加速器的剂量率比钴源装置高出几个数量级，且加工速度更快，因此更适于冷链食品的辐照杀菌[13-14]。与传统热杀菌技术相比，辐照在保障低温肉类产品的食用安全方面更有优势。例如，牛肉中的沙门氏菌和大肠杆菌等病原微生物对辐照敏感，低剂量处理即可保障牛肉预制食品的食用安全，中国、美国、俄罗斯、南非等许多国家都已批准使用辐照技术用于冷冻牛肉中微生物控制[15-16]。

辐照对食品中的微生物（尤其是病原微生物）有良好的杀灭效应，但可能会在某些食品中引起异味、色泽劣变等不良感官品质变化。部分肉类食品经辐照后易产生类似“臭鸡蛋、烧焦、醋酸”等不良风味，从而影响消费者的接受度[17]。研究发现，牛肉、火腿、三文鱼等红肉类对辐照更敏感，辐照后肌红蛋白易发生氧化，容易出现产品特征性红色消退[18]。随着辐照食品种类的拓展和深入研究，辐照对食品风味、色泽等感官品质的不良影响已成为食品辐照加工技术应用的主要障碍。研究发现，辐照剂量和辐照源种类均可影响食品的风味和色泽，辐照剂量越低，对风味的影响越小。与γ射线相比，电子束辐照可以更好地保持意式风干火腿[19]、鸡肉调味粉[20]的风味，并降低辐照异味。因此，可综合利用其他微生物控制措施或护色措施，尽可能降低辐照剂量，保障辐照食品的风味、色泽稳定，实现添加剂和辐照的综合应用，以保障产品的安全和质量。Robichaud等[21]研究碳酸钠结合γ射线辐照以提高婴儿配方奶粉中病原微生物的辐照敏感性，发现鼠伤寒沙门氏菌、大肠杆菌和蜡样芽孢杆菌的D_{10}值分别为未添加处理的

76.9%、50.0%和24.4%。

作者前期研究了不同电子束辐照剂量的杀菌效果，并探索了不同植物精油和护色剂对牛肉的抑菌效果和色泽保持作用，从中筛选出抑菌效果良好的丁香精油和一种护色剂，它们均属于食品添加剂。通过研究电子束辐照结合杀菌剂丁香油和护色剂对预制牛肉饼的杀菌效果和感官品质的影响，为牛肉预制食品辐照加工中的质量控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 牛肉糜

购买新鲜牛腩肉，低温运至实验室，流水冲洗后吸干表面水分，使用绞肉机绞碎成肉糜，于4 ℃冷藏备用，并在2 h内完成后续处理。

1.1.2 食品病原微生物菌株

大肠杆菌（ATCC25922）、鼠伤寒沙门氏菌（ATCC14028）、金黄色葡萄球菌（ATCC6538）：广东环凯微生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

10MeV & 20KW电子加速器：IS1020型，同方威视科技股份有限公司；二级生物安全柜：1300系列A2型，美国Thermo Fisher Scientific公司；拍打器：BAGMIXER400型，法国Interscience公司；台式高速冷冻离心机：3K30型，德国Sigma公司；色差仪：Chroma Meter CR-400型，日本柯尼卡美能达公司；电子鼻：PEN3型，德国Airsense公司；味觉分析系统：SA402B型，日本Insent公司。

1.3 试验方法

1.3.1 病原微生物菌液制备

将冷冻甘油保藏的病原微生物标准菌株进行复苏，并接种于胰酪大豆胨液体培养基（TSB）中，于（36±1）℃培养过夜。随后将培养液在胰酪大豆胨琼脂培养基（TSA）平板上划线，于（36±1）℃培养48 h制备单菌落。从TSA平板上挑取单菌落接种于TSB中，在（36±1）℃、150 r/min条件下培养过夜，得到菌体浓度为1×10^8~1×10^9 CFU/mL的菌液。

1.3.2 牛肉饼制备

在制备添加病原微生物的牛肉饼之前，首先对牛肉饼进行辐照灭菌以避免牛肉中自然微生物污染的影响。取1.1.1中制备的牛肉糜，装于封口袋中密封，然后使用电子束进行6 kGy的辐照灭菌。为确保每个包装内的牛肉糜都能均匀吸收到足够的辐照剂量，将袋内的牛肉糜轻轻拍打后铺展成厚度小于1 cm的均匀薄层。对于不添加病原微生物的牛肉饼，则直接使用1.1.1中的牛肉糜进行制作。根据表1中不同处理组的各物质添加量，分别添加食用盐、无菌水、护色剂（溶于无菌水中）和杀菌剂，混合均匀后用直径5 cm的一次性培养皿制备牛肉饼。每个肉饼的质量为30 g，厚度为1.5 cm，盖上培养皿上盖并压平。所有准备好的牛肉饼材料均存放在4 ℃冰箱中，确保从牛肉饼制备完成到辐照处理的时间不超过1 h。

表1 不同处理组的食品添加剂添加量

Table 1 Amount of food additives for different treatments

组别	食用盐质量/g	无菌水体积/mL	丁香油质量分数/%	护色剂质量分数/%
对照1（0 kGy）	1.5	6.0	0	0
对照2（1.6 kGy）	1.5	6.0	0	0
质量分数0.01%杀菌剂-1.6 kGy	1.5	6.0	0.01	0
质量分数0.10%杀菌剂-1.6 kGy	1.5	6.0	0.10	0
质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy	1.5	6.0	0	0.25
质量分数0.50%护色剂-1.6 kGy	1.5	6.0	0	0.50
质量分数0.01%杀菌剂-质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy	1.5	6.0	0.01	0.25

1.3.3 辐照处理

使用10 MeV & 20 kW直线电子加速器对牛肉饼进行辐照处理，辐照剂量为1.6 kGy，试验设置不添加食品添加剂且未辐照处理组（对照1）和不添加食品添加剂1.6 kGy电子束辐照处理组（对照2）两个对照组，每个处理组进行12次重复试验。在辐照过程中，使用重铬酸银液体化学剂量计对实际辐照剂量进行监测[22]，确保实际剂量范围符合设定剂量±10%的要求。按照GB 16640—2008进行剂量计的校准[23]。

1.3.4 微生物指标检测

对添加病原微生物的牛肉饼进行病原微生物的菌落总数测定，对未添加病原菌的牛肉饼进行菌落总数和大肠菌群的检测。菌落总数、大肠杆菌分别根据GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》[24]、GB 4789.3—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》[25]进行测定。

1.3.5 色差测定

采用Chroma Meter CR-400色差仪对牛肉饼的色差值进行测定，每个牛肉饼测试3个部位，每个部位测定3个重复，选择CIELCH色空间，记录L^*、C^*、H^*和ΔE值。其中L^*表示明度值，C^*表示饱和度值，H^*表示色调角度值，ΔE为以基准色为依据计算出的总色差值。

1.3.6 感官评价和电子鼻风味测试

分别对不同处理组的生牛肉饼和熟牛肉饼进行感官评价。熟牛肉饼为生牛肉饼在90 ℃水浴锅中加热30 min至中心温度达到75 ℃的样品[26]。采用5点制评分法分别对样品的嗅感风味和色泽进行评价，参考Sohn等[27]的方法并稍加修改，评价由10名人员组成。嗅感评分标准为：不可接受为0~1分，可接受为2~3分，喜欢为4~5分。色泽评分标准为：红色严重消退，不可接受为0~1分；红色轻度消退，可接受为2~3分；红色基本无消退，喜欢为4~5分。

电子鼻为PEN3，配备的气敏传感器探头为W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W和W3S，其响应物质分别为：W1C对应芳香成分，W5S对应氮氧化合物，W3C对应氨水和芳香胺成分，W6S对应氢气（氢化物），W5C对应烷烃芳香成分（短链烷烃），W1S对应甲烷（甲基类），W1W对应硫化物，W2S对应乙醇（醇类），W2W对应芳香成分和有机硫化物，W3S对应长链烷烃。取2 g牛肉饼样品置于20 mL顶空瓶中，静置20 min后进行检测。检测条件：测定间隔为1 s，清洗时间为120 s，归零时间为5 s，准备时间为5 s，测定时间为100 s，载气流量为400 mL/min，进样流量为400 mL/min，采集信号时间为80 s。每个样品重复测定3次，并保持测试室温为25 ℃。测定结果利用Winmuster软件进行响应值分析和主成分分析（principal component analysis，PCA）。

1.3.7 电子舌滋味测试

使用SA402B味觉分析系统，该系统生物传感器阵列包括酸味、苦味、涩味、鲜味和咸味5个味觉传感器和2个参比电极，用于获取8种滋味响应值。这些响应值分别为酸味（sourness）、苦味（bitterness）、涩味（astringency）、苦味回味（aftertaste-B）、涩味回味（aftertaste-A）、鲜味（umami）、丰富度（即鲜味回味，richness）和咸味（saltiness）。在使用前，传感器和参比电极需按要求于参比溶液（3.33 mol/L氯化钾溶液）中活化24 h。

称取25 g熟牛肉饼样品，加入125 mL超纯水并匀浆1 min，匀浆液于4 ℃、3 000 r/min条件下离心10 min，取上清液过滤，并将滤液于4 ℃下保存备用。

在进行电子舌数据采集前，使用参比溶液、正极清洗液（10 mmol/L氢氧化钾、100 mmol/L氯化钠和体积分数30%乙醇）和负极清洗液（100 mmol/L盐酸和体积分数30%乙醇）对传感器进行检测，以确保数据的可靠性和稳定性。在检测过程中，室温控制在25 ℃，样品预先放置在25 ℃环境中自然升温至室温后开始测定。参照孔中放置参比溶液，每个样品的采集时间为30 s，每个样品重复检测4次，选取后3次较稳定的响应信号的平均值作为该样品的滋味响应值。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 17.0统计分析软件进行单因素方差分析（ANOVA），$P<0.05$表示差异显著。利用Origin 2018软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 杀菌剂丁香油对电子束辐照牛肉饼微生物及感官品质的影响

在4 ℃冷藏期间，添加了大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌的牛肉饼的3种病原微生物水平均无明显变化，见表2。经过1.6 kGy电子束辐照后，牛肉饼中的病原微生物水平下降了2~4个数量级，其中沙门氏菌和金黄色葡萄球菌的下降幅度大于大肠杆菌。在4 ℃冷藏期间，辐照牛肉饼中病原微生物水平的变化幅度因微生物种类而异，大肠杆菌变化较小，而鼠伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌随冷藏时间的延长明显下降。添加杀菌剂丁香油后，辐照牛肉饼中3种病原微生物的水平均明

显降低，且丁香油质量分数越高降低幅度越大。大肠杆菌对丁香油较为敏感，质量分数0.01%丁香油处理的电子束辐照牛肉饼中未检测出大肠杆菌；质量分数0.01%、0.10%丁香油处理的牛肉饼未经电子束辐照时仍检出了金黄色葡萄球菌，但其存活水平随着冷藏时间的延长而降低，第3、7天时均未检出；鼠伤寒沙门氏菌对丁香油敏感性最低，在质量分数0.01%、0.10%丁香油处理的电子束辐照牛肉饼中，冷藏第3天时仍有检出，但其存活水平也随着冷藏时间的延长而降低，在第7天时未检出。

表2 杀菌剂质量分数对电子束辐照牛肉饼中添加的病原微生物杀灭效果的影响

Table 2 Effects of different mass fraction of germicidal agent on the sterilization efficacy for pathogenic microorganisms added in beef patties irradiated by electron beam

组别	大肠杆菌菌落数/lg（CFU/g）			鼠伤寒沙门氏菌菌落数/lg（CFU/g）			金黄色葡萄球菌菌落数/lg（CFU/g）		
	0 d	3 d	7 d	0 d	3 d	7 d	0 d	3 d	7 d
对照1（0 kGy）	5.6	5.6	6.0	5.9	6.0	5.3	6.8	6.9	7.0
对照2（1.6 kGy）	2.8	2.8	3.0	3.2	2.4	1.6	3.2	2.3	1.1
质量分数0.01%杀菌剂−1.6 kGy	—	—	—	1.3	0.8	—	1.3	—	—
质量分数0.10%杀菌剂−1.6 kGy	—	—	—	0.5	0.5	—	1.0	—	—

不同质量分数的杀菌剂对电子束辐照牛肉饼中微生物的杀灭效果见表3。牛肉饼自身菌落总数水平较高且检出大肠菌群。菌落总数和大肠菌群均随冷藏时间的延长而增加，其中菌落总数增加速度较快，初始值高于5 lg（CFU/g），冷藏7 d时超过7 lg（CFU/g）。经过1.6 kGy电子束辐照后，牛肉饼中的菌落总数下降了约2个数量级，大肠菌群未检出。在电子束辐照的基础上配合杀菌剂丁香油可进一步降低牛肉饼的菌落总数，且丁香油质量分数越高降低幅度越大。其中质量分数0.01%丁香油处理的电子束辐照牛肉饼于4 ℃冷藏7 d后，其菌落总数水平接近未添加杀菌剂辐照处理时的初始水平，大肠菌群未检出。

丁香油是我国食品添加剂目录中允许使用的食品用天然香料[28]，其主要成分丁香酚对多种细菌、霉菌都有良好的抑制效果[29-30]。崔英丽等[31]发现气调参数为体积分数45%的O_2、50%的CO_2与5%的N_2和丁香/肉桂联合使用可将冷藏牛肉的保鲜期延长至16 d，较空气对照组延长了11 d。研究发现，1.6 kGy低剂量电子束辐照结合丁香油可进一步降低牛肉饼中的微生物水平，并可显著抑制4 ℃冷藏期间牛肉饼的微生物繁殖，货架期7 d的牛肉饼菌落总数与未经过电子束辐照的样品菌落总数无显著差异。

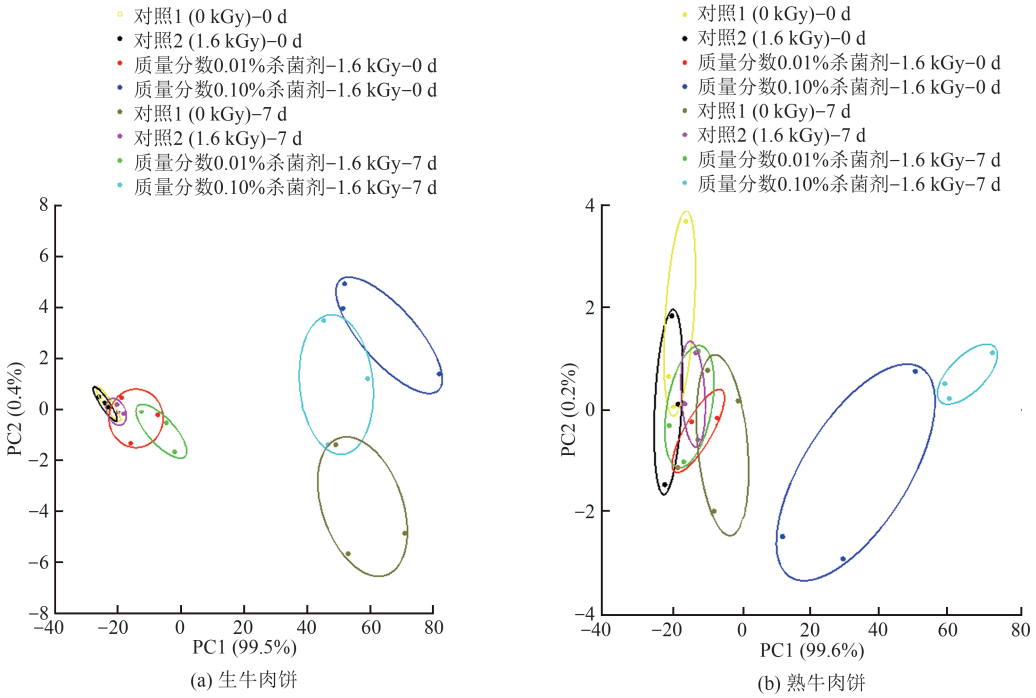
表3 不同质量分数杀菌剂对电子束辐照牛肉饼中微生物的杀灭效果

Table 3 Sterilization efficacy of germicidal agent at different mass fraction for microorganisms in beef patties irradiated by electron beam

组别	菌落总数/lg（CFU/g）		大肠菌群/lg（MPN/g）	
	0 d	7 d	0 d	7 d
对照1（0 kGy）	5.2	7.4	2.7	3.3
对照2（1.6 kGy）	3.3	4.7	—	—
质量分数0.01%杀菌剂−1.6 kGy	2.8	3.6	—	—
质量分数0.1%杀菌剂−1.6 kGy	1.0	1.7	—	—

试验发现，质量分数0.10%的杀菌剂丁香油处理后，牛肉饼产生了不良风味。利用电子鼻检测不同质量分数杀菌剂处理的牛肉饼风味变化，并将数据进行主成分分析。不同处理组间的数据点越分散，表明相应样本的电子鼻风味特征差异越大。生、熟牛肉饼的PC1和PC2的累积贡献率均大于90%，能够反映样品的整体信息，见图1。生牛肉饼的未辐照处理组与1.6 kGy电子束辐照处理组有较大区域重叠，距离较近；丁香油处理组与未添加处理组的距离有所增加，其中质量分数0.01%丁香油处理组与未添加处理组仍有区域重叠，但质量分数0.10%丁香油处理组与未添加处理组、质量分数0.01%丁香油处理组距离较远，见图1（a）。4 ℃冷藏7 d后，未辐照7 d样本与初始样本（未辐照0 d）距离较远，1.6 kGy电子束辐照及质量分数0.01%丁香油处理的样本与初始样本距离较近，而质量分

数0.10%丁香油处理组与未添加处理组、质量分数0.01%丁香油处理组的距离与0 d时表现一致，距离较远。表明1.6 kGy电子束辐照、质量分数0.01%丁香油结合1.6 kGy电子束辐照对生牛肉饼风味影响较小，4 ℃冷藏7 d后生牛肉饼风味发生较大变化，而1.6 kGy电子束辐照、质量分数0.01%丁香油结合1.6 kGy电子束辐照均可抑制其变化，更好地保持原有风味。在熟牛肉饼处理组中，不同处理方式及不同冷藏时间的熟牛肉饼样本间的距离较生牛肉饼近，除质量分数0.10%丁香油结合1.6 kGy电子束辐照的样本距离比其他处理组远，未辐照、1.6 kGy电子束辐照、质量分数0.01%丁香油结合1.6 kGy电子束辐照的样本距离较近，并互有重叠，见图1(b)。表明牛肉饼熟制后，电子束辐照、添加质量分数0.01%丁香油和冷藏7 d对风味的影响变小，各处理组间差异较小。



(a) 生牛肉饼　　(b) 熟牛肉饼

图1　不同质量分数杀菌剂处理的电子束辐照牛肉饼风味变化的PCA分析

Fig. 1　PCA analysis of flavor changes in electron beam irradiated beef patties treated with germicidal agent at different mass fraction

电子舌对不同滋味响应值的最低阈值分别为：咸味为6，酸味为13，其他为0。不同处理方式及不同冷藏时间牛肉饼的电子舌响应信号值见图2。鲜味、丰富度、咸味和苦味传感器表现出较高的响应值，其他滋味传感器响应值均小于或接近最低阈值。质量分数0.10%丁香油结合1.6 kGy电子束辐照牛肉饼，其苦味和苦味回味有所上升，电子束辐照处理的鲜味响应值稍低于丁香油添加剂处理组。不同处理组间的滋味传感器响应值总体差异较小，表明1.6 kGy电子束辐照、添加质量分数0.01%丁香油和4 ℃冷藏7 d对牛肉饼滋味影响较小。

丁香是一种常见的食物香料，在食品烹饪中广泛应用。丁香油是丁香的主要组分，因其香味浓郁，对食品的风味会产生一定的影响。张圣江等[32]研究发现，香菇酱中添加丁香提取物可有效抑制菌落生长，但随着其质量分数的增加，产品的刺激性气味也逐渐突出，当丁香提取物添加质量分数为0.9%时产品气味略重。该研究得出了类似的结果，添加丁香也可影响牛肉饼风味，影响程度因添加质量分数而异。质量分数0.10%的丁香油给牛肉饼带来了不良风味，而质量分数0.01%处理组的牛肉饼的电子鼻风味图谱与对照组较为接近。感官评价结果也表明，1.6 kGy低剂量电子束辐照联合质量分数0.01%丁香油和质量分数0.25%护色剂对牛肉饼的风味无不良影响。

2.2　护色剂对电子束辐照牛肉饼感官品质的影响

护色剂质量分数对电子束辐照生牛肉饼总色

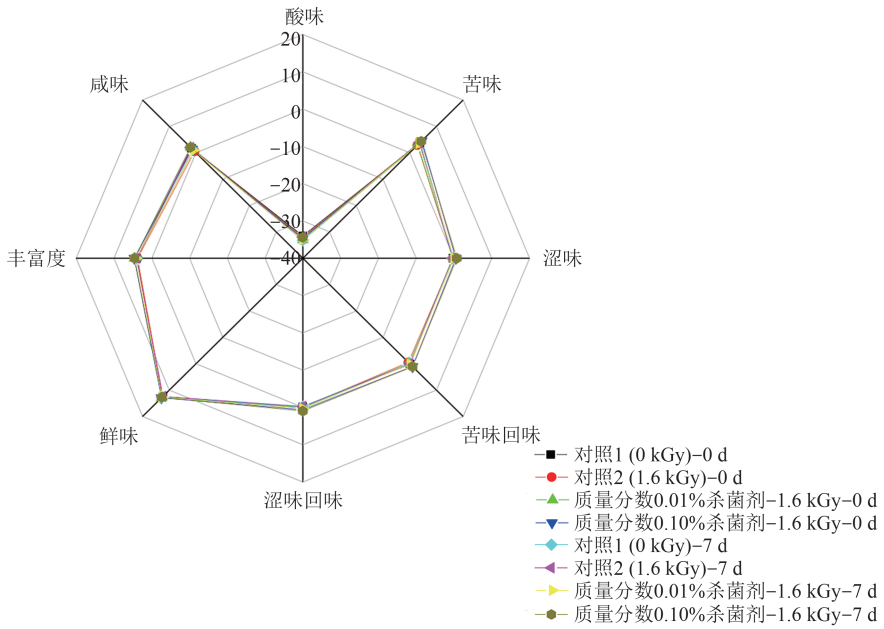
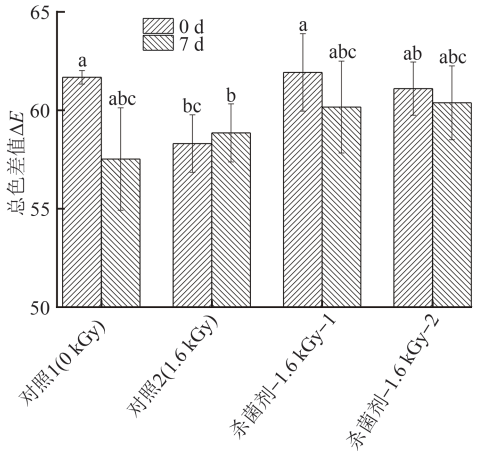


图 2　不同质量分数杀菌剂处理的电子束辐照牛肉饼的滋味雷达图

Fig. 2　Taste radar chart of electron beam irradiated beef patties treated by germicidal agent at different mass fraction

差值的影响见图 3。以初始样品（未辐照 0 d 的样品）的总色差值为基础，比较各处理组间的总色差值变化。结果发现，1.6 kGy 电子束辐照后生牛肉饼总色差值变化较大，添加护色剂抑制了辐照导致的总色差变化，但其抑制幅度不随护色剂质量分数的增加而增大。牛肉饼于 4 ℃冷藏 7 d 后，未辐照生牛肉饼的总色差值稍有变化，但与初始样本差异不显著；护色剂结合电子束辐照可抑制冷藏期间的总色差值变化。1.6 kGy 电子束辐照 0、7 d 的生牛肉饼的总色差值与初始总色差值均有显著差异，而添加护色剂的电子束辐照处理组与初始样品的总色差值差异不显著。这表明添加质量分数 0.25% 护色剂即可显著抑制电子束辐照导致的色泽变化，并有利于冷藏期间生牛肉饼固有色泽的保持，减少未辐照生牛肉饼冷藏期间的色泽变化。

以初始样本（未辐照）的色泽为标准，对不同处理方式及不同冷藏时间的生牛肉饼进行色泽感官评价，结果见表 4。生牛肉饼经过辐照后，红色明显消退，色泽感官评分显著低于未辐照处理组。4 ℃冷藏 7 d 后，未辐照生牛肉饼红色稍有消退，但色泽感官评分与初始样本无显著差异；添加护色剂抑制了辐照导致的红色消退，感官评分显著高于辐照处理组，但不同质量分数护色剂处理组间无显著差异，这与色差值变化结果一致。牛肉饼熟制后，不同处理组间色泽感官评分的差异变小。未辐照牛肉饼熟制后红色消退，与辐照处理组间的色泽感官评分无显著差异，添加护色剂的熟牛肉饼仍保持较好的红色，感官评分显著高于对照组。4 ℃冷藏 7 d 对牛肉饼色泽感官评分影响较小，相同处理方式下 0 d 和 7 d 的样品色泽感官评分均无显著差异。



不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 3　不同质量分数护色剂处理的电子束辐照牛肉饼的总色差值

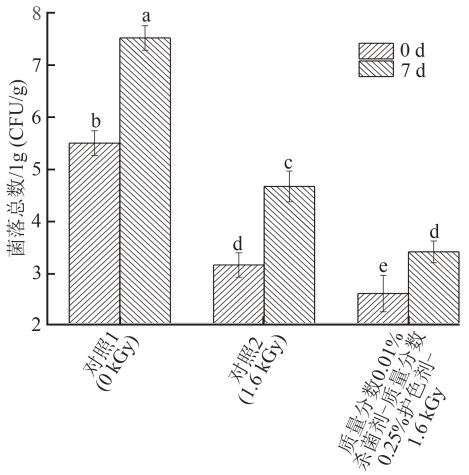
Fig. 3　Total color deviation of electron beam irradiated beef patties treated by color fixative at different mass fraction

表4　不同质量分数护色剂处理的电子束辐照牛肉饼的色泽感官评分

Table 4　Color panel score of electron beam irradiated beef patties treated by color fixative at different mass fraction

组别	生牛肉饼	熟牛肉饼
对照1（0 kGy）-0 d	5.0±0.0^{a}	2.6±1.0^{b}
对照2（1.6 kGy）-0 d	1.4±0.5^{e}	2.3±0.9^{b}
质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy-0 d	3.1±1.1^{d}	4.4±1.1^{a}
质量分数0.50%护色剂-1.6 kGy-0 d	3.3±1.2^{cd}	4.5±1.0^{a}
对照1（0 kGy）-7 d	4.3±0.8^{ab}	2.5±1.1^{b}
对照2（1.6 kGy）-7 d	1.8±0.8^{e}	2.7±1.1^{b}
质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy-7 d	3.2±0.9^{cd}	4.1±0.8^{a}
质量分数0.50%护色剂-1.6 kGy-7 d	3.9±1.2^{bc}	4.2±0.8^{a}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。



不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图4　联合添加杀菌剂和护色剂对电子束辐照牛肉饼中菌落总数的影响

Fig. 4　Effects of combined addition of germicidal agent and color fixative on total microbial count in beef patties irradiated by electron beam

2.3　联合添加杀菌剂和护色剂对电子束辐照牛肉饼微生物及感官品质的影响

生牛肉饼自然污染的初始菌落总数（未辐照）高于5 lg（CFU/g），见图4。经过1.6 kGy电子束辐照处理后，菌落总数显著降低，而质量分数0.01%杀菌剂-质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy牛肉饼的菌落总数显著低于单一电子束辐照处理组。各处理组在4 ℃冷藏7 d后，所有生牛肉饼的菌落总数均显著增加，但电子束辐照、质量分数0.01%杀菌剂-质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy组的菌落总数均显著低于初始菌落总数，其中杀菌剂-护色剂-1.6 kGy组的菌落总数最低，与电子束辐照0 d的样品无显著差异。

联合添加杀菌剂和护色剂对电子束辐照牛肉饼感官评分的影响见表5。1.6 kGy电子束辐照、质量分数0.01%杀菌剂-质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy处理对生、熟牛肉饼的风味均无显著影响。在4 ℃冷藏7 d后，所有处理组的风味均未发生显著变化。未辐照处理组在4 ℃冷藏7 d后，风味评分稍有降低，这与添加单一杀菌剂试验中电子鼻的结果一致。虽然其分值与未辐照的样品的分值差异不显著，但显著低于质量分数0.01%杀菌剂-质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy组冷藏7 d的样品。1.6 kGy电子束辐照对生牛肉饼色泽评分影响较大，经过1.6 kGy辐照处理后，牛肉饼红色消退，其色泽评分显著降低。但联合添加杀菌剂和护色剂可显著提高生牛肉饼的色泽评分。当生牛肉饼熟制后，电子束辐照对色泽的影响降低，但电子束辐照与未辐照处理组之间无显著差异；而联合添加杀菌剂和护色剂可显著提高熟牛肉饼的色泽评分，高于未辐照处理和电子束辐照处理组。牛肉饼

表5　联合添加杀菌剂和护色剂的电子束辐照牛肉饼的感官评分结果

Table 5　Sensory evaluation results of irradiated beef patties with combined addition of germicidal agent and color fixative

组别	风味		色泽	
	生牛肉饼	熟牛肉饼	生牛肉饼	熟牛肉饼
对照1（0 kGy）-0 d	2.8±1.3^{ab}	3.2±1.2^{a}	5.0±0.0^{a}	2.8±1.0^{b}
对照2（1.6 kGy）-0 d	2.5±0.7^{ab}	3.3±1.1^{a}	1.4±0.5^{c}	2.6±1.3^{b}
质量分数0.01%杀菌剂-质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy-0 d	3.1±0.9^{ab}	4.0±1.3^{a}	3.5±0.5^{b}	3.8±0.8^{a}
对照1（0.0 kGy）-7 d	2.3±0.7^{b}	3.1±1.4^{a}	4.5±0.9^{a}	2.6±1.3^{b}
对照2（1.6 kGy）-7 d	3.0±0.9^{ab}	3.8±1.1^{a}	1.3±0.5^{c}	2.7±1.3^{b}
质量分数0.01%杀菌剂-质量分数0.25%护色剂-1.6 kGy-7 d	3.2±0.9^{a}	4.1±1.0^{a}	3.7±0.7^{b}	4.0±0.8^{a}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

于 4 ℃冷藏 7 d 后，所有处理组的色泽均未发生显著变化，与风味评分结果一致。

辐照对牛肉感官品质的影响较明显，产品特征性红色容易消退[18]。1.6 kGy低剂量电子束辐照导致牛肉饼红色明显消退，添加护色剂后可显著抑制辐照导致的色泽劣变，因此添加护色剂的牛肉饼色泽评分显著高于辐照处理组，且经过熟制后牛肉饼仍呈现令人愉悦的红色色泽。另外，护色剂是用于水分保持和品质改良的食品添加剂。该研究所用护色剂的质量分数为0.25%，我国规定其在预制肉制品中最大添加量为5 g/kg[28]，因此符合国家标准。

生、熟牛肉饼中响应值较高的传感器为W1W、W2W、W5S 和 W1S，在不同处理组间响应值差异较大的传感器为 W1W，表明造成风味差异的主要物质是硫化物，见图 5。对于生牛肉饼，不同处理组在 W1W 传感器上的响应值从高到低依次为：质量分数 0.01% 杀菌剂－质量分数 0.25% 护色剂－1.6 kGy 辐照 0 d、未辐照 0 d、未辐照 7 d、电子束辐照 0 d、质量分数 0.01% 杀菌剂－质量分数 0.25% 护色剂－1.6 kGy 辐照 7 d、电子束辐照 7 d。总体上表现为：在相同处理条件下，冷藏后的 W1W 响应值降低；在相同冷藏时间，电子束辐照的响应值低于其他 2 个处理组。对于熟牛肉饼，不同处理组在 W1W 传感器上的响应值从高到低的顺序与生牛肉饼有所不同，依次为：质量分数 0.01% 杀菌剂－质量分数 0.25% 护色剂－1.6 kGy 辐照 0 d、未辐照 7 d、质量分数 0.01% 杀菌剂－质量分数 0.25% 护色剂－1.6 kGy 辐照 7 d、未辐照 0 d、电子束辐照 0 d、电子束辐照 7 d。电子束辐照的响应值也低于其他 2 个处理组，这一结果与生牛肉饼相同。

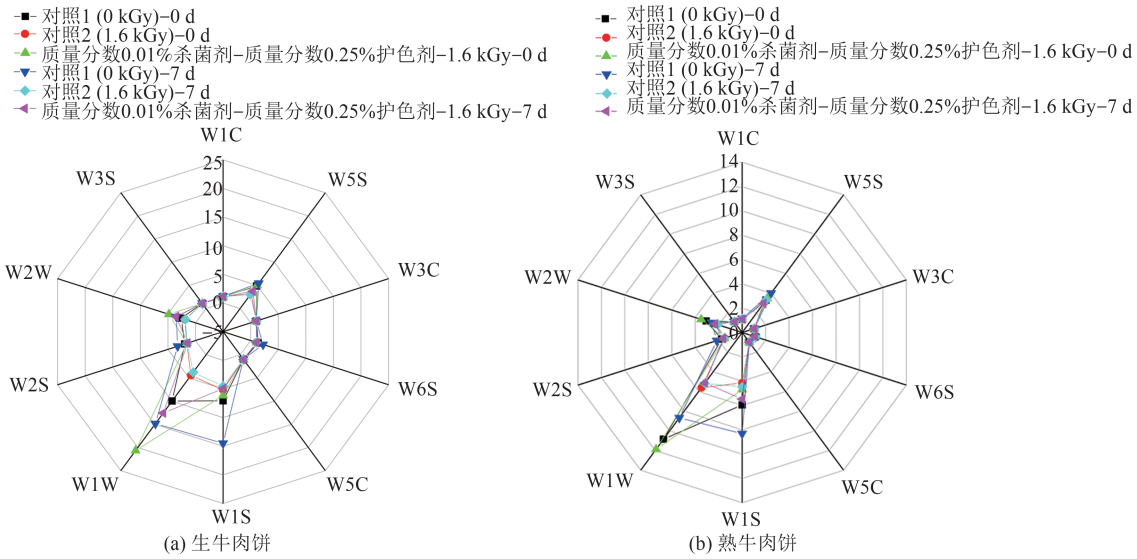


图 5　联合添加杀菌剂和护色剂的电子束辐照牛肉饼的风味雷达图

Fig. 5　Flavor radar chart of electron beam irradiated beef patties with combined addition of germicidal agent and color fixative

牛肉饼在鲜味、丰富度、咸味和苦味传感器上表现出较高的响应值，而其他滋味传感器响应值均小于或接近阈值，见图 6。其中响应值最高的是鲜味及丰富度。电子束辐照组的鲜味和丰富度响应值低于未辐照处理组，而联合添加杀菌剂和护色剂有效提高了牛肉饼的鲜味和丰富度，其响应值均高于未辐照处理组。单一丁香油处理组对牛肉饼鲜味的响应值无明显影响，表明添加护色剂可有效提高牛肉饼的鲜味和丰富度。在相同处理条件下，4 ℃冷藏 0、7 d 的牛肉饼的鲜味和丰富度响应值差异较小。

基于不同处理组在色空间三维参数 L^*、C^*、H^* 上的差异，作者利用 Origin 软件对受辐照影响较大的生牛肉饼色泽参数分布绘制三维图，见图 7。不同处理组的色泽参数分布与初始样本（未辐照）的距离从近到远分别为：质量分数 0.01% 杀菌剂－质量分数 0.25% 护色剂－1.6 kGy 辐照 0 d、未辐照 7 d、质量分数 0.01% 杀菌剂－质量分数 0.25% 护色剂－1.6 kGy 辐照 7 d、电子束辐照 0 d、电子束辐照 7 d。这一结果与单独添加护色剂对电子束辐照牛肉饼的色差值（见图3）一致，表明在添加护色剂的基础上再添加杀菌剂丁香油对辐照牛肉饼的护色效果无显著影响。

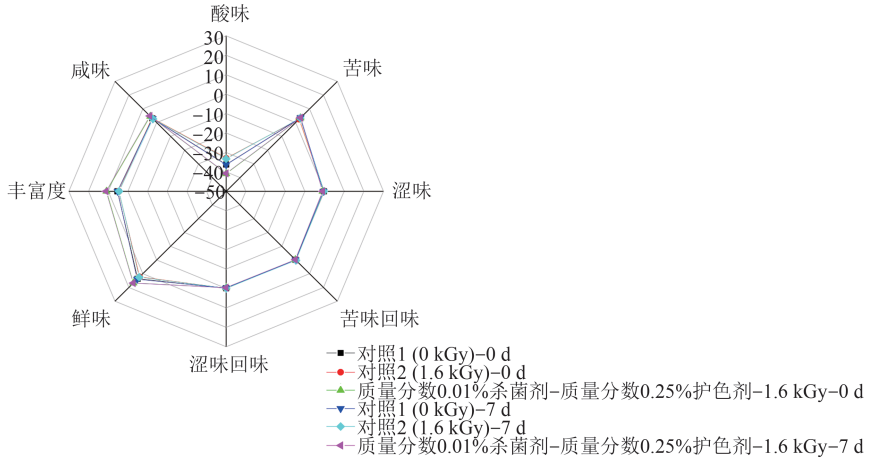


图 6　联合添加杀菌剂和护色剂的电子束辐照牛肉饼的滋味雷达图

Fig. 6　Taste radar chart of electron beam irradiated beef patties with combined addition of germicidal agent and color fixative

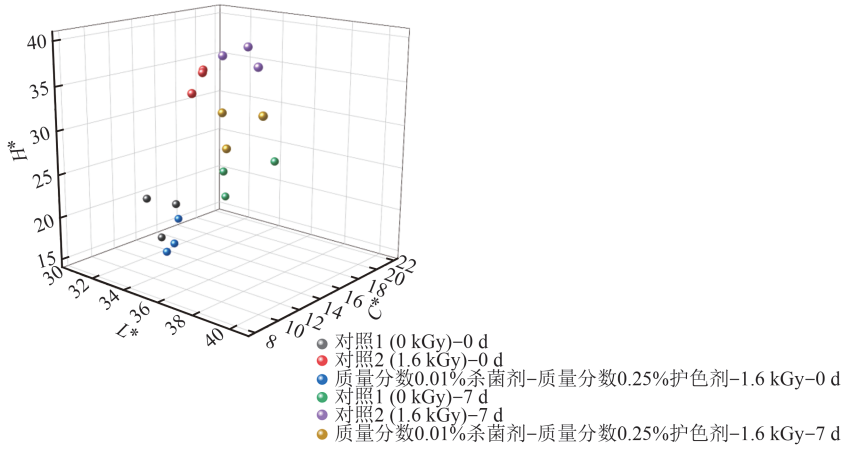


图 7　联合添加杀菌剂和护色剂对电子束辐照牛肉饼色空间参数值的分布

Fig. 7　Distribution of color space parameter values in irradiated beef patties with combined addition of germicidal agent and color fixative

3　结论

作者采用快速高效的电子束辐照杀菌技术，研究了其对预制牛肉饼微生物及感官品质的影响。结合食品添加剂丁香油和护色剂，通过添加外源病原微生物和自然污染微生物分析，确认了其杀菌增效作用。利用感官评价、电子鼻及电子舌分析，筛选出适宜的丁香油和护色剂添加水平。结果表明，1.6 kGy低剂量电子束辐照结合质量分数0.01%丁香油和质量分数0.25%护色剂处理可有效降低牛肉饼中的微生物水平，显著抑制辐照导致的红色消退，保持牛肉饼原有风味，并提高其鲜味。在4 ℃下冷藏7 d后，其菌落总数仍显著低于初始牛肉饼水平。

参考文献

[1] 方昕. 调理食品：陌生新词背后的大产业[EB/OL]. (2009-02-21)[2022-04-03]. http://www.chinavalue.net/Article/Archive/2009/2/21/160626.html.

[2] IAEA. Irradiation to ensure the safety and quality of prepared meals[EB/OL]. (2009-02)[2022-04-03]. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1365_web.pdf.

[3] 范晓攀，王娉，葛毅强，等. 预制调理食品中的常见微生物及其防控[J]. 食品工业科技，2016，37(8)：49-53，58. FAN X P，WANG P，GE Y Q，et al. Review on common microorganisms of prepared foods and the preventive measures[J]. Science and Technology of Food Industry，2016，37(8)：49-53，58.(in Chinese)

[4] 韦佩贝，戚穗坚. 疫情全球化常态化趋势下中国预制调理食品市场发展现状[J]. 食品与机械，2020，36(9)：18-25.

WEI P B，QI S J. Market development status of Chinese prepared food under the globalized epidemic trends[J]. Food & Machinery，2020，36(9)：18-25.(in Chinese)

[5] 孟子晴，祝超智，赵改名，等. 牛肉肉糜类制品加工技术研究进展[J]. 肉类研究，2018，32(12)：55-61.
MENG Z Q，ZHU C Z，ZHAO G M，et al. Recent progress in processing technologies for minced beef products[J]. Meat Research，2018，32(12)：55-61.(in Chinese)

[6] 孙宝忠. 牛肉绿色消费及其安全品质需求[J]. 畜牧产业，2021，7：41-44.
SUN B Z. Green consumption of beef and its demand for safety quality[J]. Animal Agriculture，2021，7：41-44.(in Chinese)

[7] 牛淑慧，王艺伦，徐晔，等. 乳酸和醋酸对冷却牛肉喷雾减菌效果的研究[J]. 食品科技，2020，45(1)：167-173.
NIU S H，WANG Y L，XU Y，et al. Effect of lactic acid and acetic acid spray on decontamination in cooling beef [J]. Food Science and Technology，2020，45(1)：167-173.(in Chinese)

[8] LIU Y，ZHANG F X，ZHU B W，et al. Effect of sodium lactate coating enriched with nisin on beef strip loins (*M. Longissimus lumborum*) quality during cold storage and electronic nose rapid evaluation[J]. Journal of Food Measurement and Characterization，2020，14(6)：2998-3009.

[9] TAUXE R V. Food safety and irradiation：protecting the public from foodborne infections[J]. Emerging Infectious Diseases，2001，7(suppl.3)：516-521.

[10] 高美须，陈浩，刘春泉，等. 食品辐照技术在中国的研究和商业化应用[J]. 核农学报，2007，21(6)：606-611.
GAO M X，CHEN H，LIU C Q，et al. Researches and commercialization of food irradiation technology in China [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2007，21(6)：606-611.(in Chinese)

[11] IC E，CETINKAYA N. Food safety and irradiation related sanitary and phytosanitary approaches-Chinese perspective[J]. Radiation Physics and Chemistry，2021，181：109324.

[12] MOREIRA R G，CASTELL-PEREZ M E. Innovative food processing technologies[M]. Amsterdam：Elsevier，2021：1-18.

[13] 邓文敏，陈浩，裴颖，等. 高能电子加速器在食品辐照加工中的应用分析[J]. 核农学报，2012，26(6)：919-923.
DENG W M，CHEN H，PEI Y，et al. The application analysis of high energy electron accelerator in food irradiation processing[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2012，26(6)：919-923.(in Chinese)

[14] PILLAI S D，SHAYANFAR S. Electron beam technology and other irradiation technology applications in the food industry[M]. Cham：Springer，2017：249-268.

[15] WHO. Food irradiation：a technique for preserving and improving the safety of food[M]. Geneva：WHO，1988.

[16] 郭亚萍，高美须，靳烨，等. 用辐照技术保障预制食品的安全与质量[J]. 核农学报，2005，19(3)：232-235.
GUO Y P，GAO M X，JIN Y，et al. Ensurance of hygienic safety and quality on prepared meal by irradiation [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2005，19(3)：232-235.(in Chinese)

[17] BREWER M S. Irradiation effects on meat flavor：a review[J]. Meat Science，2009，81(1)：1-14.

[18] CONCEPCIÓN CABEZA M，CAMBERO I，HOZ L，et al. Optimization of E-beam irradiation treatment to eliminate *Listeria monocytogenes* from ready-to-eat (RTE) cooked ham [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2007，8(2)：299-305.

[19] ZHENG Q，WANG H H，YUE L，et al. Effect of irradiation on volatile compound profiles and lipid oxidation in chicken powder seasoning[J]. Radiation Physics and Chemistry，2022，191：109851.

[20] KONG Q L，YAN W Q，YUE L，et al. Volatile compounds and odor traits of dry-cured ham (Prosciutto crudo) irradiated by electron beam and gamma rays[J]. Radiation Physics and Chemistry，2017，130：265-272.

[21] ROBICHAUD V，BAGHERI L，SALMIERI S，et al. Effect of γ-irradiation and food additives on the microbial inactivation of foodborne pathogens in infant formula[J]. LWT-Food science and Tehnologg，2021，139：110547.

[22] 国家技术监督局. 使用重铬酸银剂量计 测量γ射线水吸收剂量标准方法：JJF 1028—1991[S]. 北京：中国计量出版社，1991.

[23] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 辐射加工剂量测量系统的选择和校准导则：GB/T 16640—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.

[24] 国家卫生健康委员会，国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定：GB 4789.2—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2022.

[25] 国家卫生和计划生育委员会，国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数：GB 4789.3—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[26] YANG H S，LEE E J，MOON S H，et al. Addition of garlic or onion before irradiation on lipid oxidation，volatiles and sensory characteristics of cooked ground beef [J]. Meat Science，2011，88(2)：286-291.

[27] SOHN S H，JANG A，KIM J K，et al. Reduction of irradiation off-odor and lipid oxidation in ground beef by α-tocopherol addition and the use of a charcoal pack[J].

Radiation Physics and Chemistry，2009，78(2)：141-146.

[28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准：GB 2760—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[29] 都津铭，张萍，高德. 丁香精油与茶多酚复合抗菌液的抑菌活性协同作用及抗氧化活性[J]. 现代食品科技，2021，37(10)：87-95.
DU J M，ZHANG P，GAO D. Synergistic antibacterial effect and antioxidant activity of the compound liquid with clove essential oil and tea polyphenols[J]. Modern Food Science and Technology，2021，37(10)：87-95.(in Chinese)

[30] 孔秋莲，宋义忠，章丽丽，等. 丁香[*Syzygium aromaticum*(L.)Merr. et Perry]挥发油中天然抗菌成分研究[J]. 上海农业学报，2004，20(3)：68-72.
KONG Q L，SONG Y Z，ZHANG L L，et al. Natural antifungal compounds from *Syzygium aromaticum*(L.)Merr. et Perry[J]. Acta Agriculturae Shanghai，2004，20(3)：68-72.(in Chinese)

[31] 崔英丽，张憨，刘振彬，等. 气调包装和天然复合保鲜剂对冷却牛肉联合保鲜效果影响的研究[J]. 食品与生物技术学报，2017，36(4)：352-356.
CUI Y L，ZHANG M，LIU Z B，et al. Chilled beef preservation with a combination of MAP and natural preservatives[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2017，36(4)：352-356.(in Chinese)

[32] 张圣江，张憨，刘亚萍. 丁香/肉桂提取物的制备及其在香菇酱防腐中的应用[J]. 食品与生物技术学报，2014，33(8)：865-869.
ZHANG S J，ZHANG M，LIU Y P. Study on the extracts of clove/cinnamon and its antisepsis for the *Lentinus edode* sauce[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2014，33(8)：865-869.(in Chinese)

（责任编辑：刘冬梅）

(上接第83页)

[26] 黄继红，章发盛，黄静，等. 湘西茶叶茶多酚等8种活性物质及含量分析[J]. 农业与技术，2020，40(1)：21-23.
HUANG J H，ZHANG F S，HUANG J，et al. Analysis of 8 active substances and content of tea polyphenols in Xiangxi tea [J]. Agriculture and Technology，2020，40(1)：21-23.(in Chinese)

[27] 冯瑛，李洁，王旭捷，等. 内部沸腾法提取茶多酚工艺优化及其与水提法的比较[J]. 食品工业科技，2019，40(18)：160-164，176.
FENG Y，LI J，WANG X J，et al. Optimization of extraction process of tea polyphenols by internal boiling method and comparison with water extraction method[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(18)：160-164，176.(in Chinese)

[28] 王祺. EGCG-明胶复合膜物化性质及其对冷藏罗非鱼片品质的保持机制[D]. 海口：海南大学，2019.

[29] 杨贤强，王岳飞，陈留记. 茶多酚化学[M]. 上海：上海科学技术出版社，2003.

[30] 马冉冉，张丹丹，徐莹，等. 库德毕赤酵母包埋茶多酚工艺及稳定性研究[J]. 食品与发酵工业，2019，45(16)：63-69.
MA R R，ZHANG D D，XU Y，et al. Tea-polyphenols embedded by *Pichia kudriavzevii* A16 ghost and its stability[J]. Food and Fermentation Industries，2019，45(16)：63-69.(in Chinese)

[31] YIN C Y，CHENG L，ZHANG X，et al. Nanotechnology improves delivery efficiency and bioavailability of tea polyphenols[J]. Journal of Food Biochemistry，2020，44(9)：e13380.

（责任编辑：史润东东）